超高分辨率石英光纤传像束

许彦涛,郭海涛,侯超奇,崔晓霞,高 菘,张 岩,折胜飞
(中国科学院西安光学精密机械研究所光子功能材料与器件研究室,西安 710119)

摘要:石英光纤传像束在医疗诊断、工业设备探伤、电力设施监测、大视场成像等领域具有重要应用。本文利用溶胶-凝胶法在像元单丝间隙中引入吸收剂,解决了传像束光串扰难题。采用一次复丝工艺,制备出外径为600 μm、像元为15 000的石英光纤传像束,像元单丝直径约4.4 μm,分辨率约为113 lp/mm。结果表明,传像束无暗丝、断丝,成像清晰,无畸变,达到了商品化使用需求。

关键词:光纤传像束; 石英光纤; 高分辨率; 复丝法; 溶胶-凝胶法; 吸收剂
中图分类号:TB34 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-1625(2022)11-3777-04

Coherent Silica Fiber Bundles with Ultra-High Resolution

XU Yantao, GUO Haitao, HOU Chaoqi, CUI Xiaoxia, GAO Song, ZHANG Yan, SHE Shengfei
(Research Laboratory of Photonic Functional Materials and Devices, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Coherent silica fiber bundles have important applications in medical diagnosis, industrial equipment defects detection, high-voltage transformer winding monitoring, and large field optical systems. The sol-gel method is used to introduce absorbent into pixel monofilament gap, which successfully solves the problem of crosstalk in bundles. Silica fiber bundles with 600 μm outer diameter, 15 000 pixels, 4.4 μm pixel diameter, and resolution of 113 lp/mm were prepared by one-step multiple-fiber process. The results show that there are no dark or broken pixels, no distortion in bundles and the image is clear, which means the coherent silica fiber bundles meet the commercial use requirements.

Key words: coherent fiber bundle; silica fiber; high resolution; multiple-fiber method; sol-gel method; absorbent

0 引 言

光纤传像束是大量光学纤维集束在一起且两端光纤呈规则排列的一种可实现图像传递的无源光学器件,具有柔软易弯曲、抗电磁干扰等特点,在国防、医疗等领域获得了广泛应用[1-3]。国内长春理工大学[4]、北京玻璃研究院[5]、华东理工大学[6]等诸多高校和科研机构于20世纪90年代先后开展了基于酸溶法制备玻璃光纤传像束的研究,成功研制出单丝直径约8 μm、分辨率≥50 lp/mm、断丝率≤0.3%的光纤传像束。近年来,随着对传像束分辨率要求的进一步提高,光纤单丝直径需要降至5 μm以内,传统玻璃光纤传像束受机械强度的制约,无法满足要求,石英光纤传像束应运而生。相对于玻璃光纤,石英光纤具有机械性能好、损耗低、耐高温等优点,是制备超细(传像束直径<1 mm)、高分辨(分辨率>100 lp/mm)光纤传像束的理想材料。国际上,日本、英国等发达国家率先开展了相关研究,研制的传像束单丝直径低至3.25 μm,分辨率高达154 lp/mm[7-8],在高端医疗领域处于垄断地位。国内开展石英光纤传像束研究的机构较少,目前尚未有商用产品问世。

本文深入开展了超细高分辨石英光纤传像束的研究,创造性地利用溶胶-凝胶法在像元单丝间隙中引入了含有过渡金属离子的SiO_2溶胶吸收层,解决了石英传像束光串扰问题,采用一次复丝工艺,成功制备出

收稿日期:2022-08-15;**修订日期**:2022-09-21
基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0303804);光纤光缆制备技术国家重点实验室开放基金(SKLD1903)
作者简介:许彦涛(1983—),男,副研究员。主要从事光学材料和特种光纤的研究。E-mail:xuyantao@opt.ac.cn
通信作者:郭海涛,博士,研究员。E-mail:guoht_001@opt.ac.cn

15 000 像元石英传像束。通过优化过渡金属离子种类和含量,获得了过渡金属离子掺杂 SiO_2 吸收溶液在可见光波段的吸收光谱曲线。超细高分辨石英光纤传像束的成功研制对推动我国高端医疗器件的发展具有重要意义。

1　实　验

1.1　样品制备

传像束的制备采用一次复丝工艺,先拉制 250 ~ 500 μm 的光纤单丝,然后在模具中将单丝有序排制组束,得到复丝棒;之后将复丝棒浸泡在含有过渡金属离子的 SiO_2 溶胶溶液中,经烘干、真空烧结后,吸收剂以固态的形式填充在复丝棒单丝的间隙中;最后将复丝棒再次拉丝,得到石英光纤传像束。相比二次复丝工艺,一次复丝工艺可以避免产生复丝边界处的网格线[9],有利于提高成像质量。

过渡金属离子掺杂 SiO_2 吸收溶液采用溶胶-凝胶法制备,吸收离子为 Fe^{3+}、Co^{2+}、Ni^{2+},制得的 SiO_2 溶液的吸收光谱见图 1。可以看出,该吸收液在可见光波段具有平坦的吸收,保障了传输图像色彩的还原度。吸收剂填充到复丝棒单丝间隙中,一方面可起到吸收串扰光的作用,另一方面可以降低拉丝时光纤单丝的畸变,有利于维持光纤阵列的规整度。

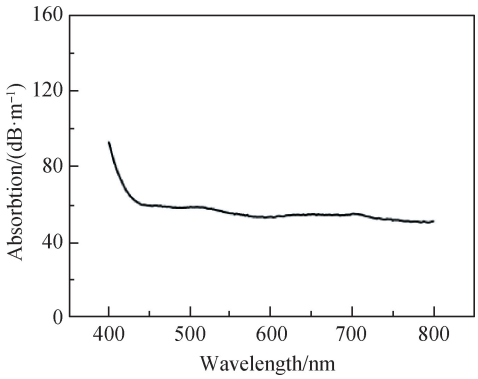


图 1　含过渡金属离子的 SiO_2 溶液吸收光谱

Fig. 1　Absorption spectrum of SiO_2 solution doped with transition metal ions

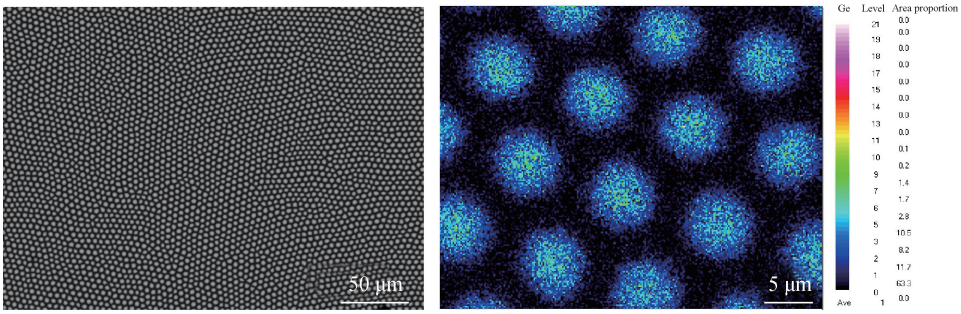
1.2　测试与表征

使用电子探针(EPMA,日本电子公司,JXA-8230,加速电压为 20 kV,电子束直径为 5 μm)观察光纤束端面和测试端面的元素分布;采用截断法,利用光纤综合参数测试仪(美国光动公司,型号 2500,测试范围为 600 ~ 1 600 nm,测试步长为 10 nm)对传像束的损耗进行测试;采用自行搭建的测试系统对传像束成像性能进行测试,目标物经自聚焦透镜(飞秒光电科技(西安)有限公司)成像于传像束入射端面,图像经传像束传输后,成像至探测器(型号 CC501)。

2　结果与讨论

2.1　微观形貌分析

图 2(a)为制备的直径为 600 μm、像元为 15 000 的传像束端面 SEM 照片。传像束有效直径为 535 μm,像元单丝直径约为 4.4 μm,分辨率约为 113 lp/mm。通过图 2(a)可以看出,传像束像元均匀一致,无宏观缺丝、畸变、缺陷产生。图 2(b)为传像束端面的 Ge 元素分布图,可以看出 Ge 元素集中在纤芯,未出现扩散溢出,表明单丝的芯包结构保持良好,保障了传像束良好的光学性能。



(a) SEM image of coherent fiber bundles　　(b) Distribution diagram of Ge element

图 2　光纤传像束端面 SEM 照片和 Ge 元素分布图

Fig. 2　SEM image and Ge element distribution diagram of coherent fiber bundle end face

2.2　传输性能分析

取 45 m 长的光纤传像束,用激光笔照射一端,在另一端可以观测到明显的激光输出(见图 3 内插图),表明传像束的传光性能良好。截断前后光纤的长度分别为 45 m 和 5 m,在可见光范围内的损耗约为 0.1 dB/m(见图 3)。

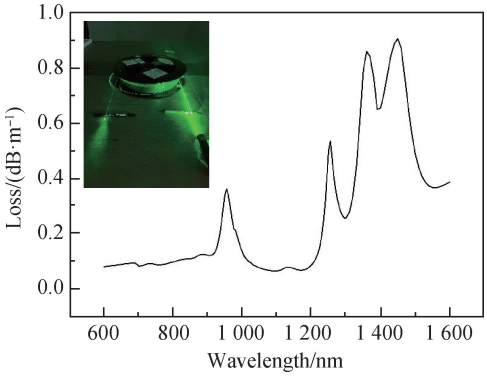
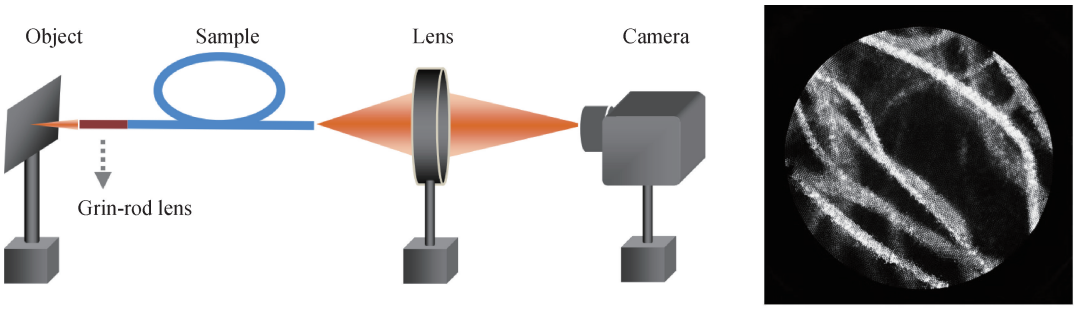


图 3　石英光纤传像束的损耗光谱

Fig. 3　Loss spectrum of coherent silica fiber bundles

2.3　成像性能分析

图 4 为传像束成像测试系统和纤维细丝成像图。利用图 4(a)所示的光纤窥镜系统,对传像束的成像性能进行了测试。目标物经自聚焦透镜成像于传像束前端,图像经传像束输出,再由成像系统输入至探测器,获得目标物图像。图 4(b)为该系统对纤维细丝的成像图,可以看出图像中的纤维无暗丝、断丝,成像清晰,像质良好,无畸变,传像束达到了实际使用要求。



(a) Bundle imaging test system　　(b) Fiber filament imaging diagram

图 4　传像束成像测试系统和纤维细丝成像图

Fig. 4　Bundles imaging test system and fiber filament imaging diagram

3　结　论

采用一次复丝法,成功制备出 15 000 像元的石英光纤传像束。采用溶胶-凝胶法在石英光纤传像束单丝间隙中引入了吸收剂,解决了单丝串扰问题。制备的传像束在可见光范围内的损耗约为 0.1 dB/m,光学性能良好,成像清晰。石英光纤传像束的成功研制,解决了高端医疗内窥镜关键器件长期依赖进口的“卡脖子”问题,对推动我国高端医疗器件的发展具有积极意义。

参　考　文　献

[1]　QI S S, ZHANG B, ZHAI C C, et al. High-resolution chalcogenide fiber bundles for longwave infrared imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(21): 26160-26165.

[2]　孙宏宇,谢　欣,卢　鑫. 基于光纤传输的柔性红外光学成像系统设计[J]. 光电技术应用,2021,36(3):11-14.
SUN H Y, XIE X, LU X. Design of flexible infrared optical imaging system based on optical fiber transmission[J]. Electro-Optic Technology

Application, 2021, 36(3): 11-14 (in Chinese).

[3] HEYVAERT S, OTTEVAERE H, KUJAWA I, et al. Numerical characterization of an ultra-high NA coherent fiber bundle part I: modal analysis[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 21991-22011.

[4] ZHOU D C, YU F X, TAN F, et al. Preparation and optical performance detection of acid-leaching optical fiber image bundle[C]//Proc SPIE 7282, 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. Chengdu: SPIE, 2009.

[5] 扈性纯. 酸溶法光纤传像束暗丝分析[J]. 应用光学,1998,19(1):26-31.
HU X C. Analysis of dark fiber in image transmitting fiber bundle using acid solution method[J]. Journal of Applied Optics, 1998, 19(1): 26-31 (in Chinese).

[6] 王中俭,夏 冬,胡一晨,等. 酸溶法柔性光纤传像束的玻璃组成及性能[J]. 材料科学与工程学报,2009,27(6):809-812+836.
WANG Z J, XIA D, HU Y C, et al. Glass compositions and properties for the fabrication of flexible image bundle by using acid leaching process[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2009, 27(6): 809-812+836 (in Chinese).

[7] MATSUDA Y, HATTORI Y, CHIGUSA Y. Low-loss high-resolution silica image fiber fabricated by the new multiple-fiber method[C]//Optical Fiber Communication. Washington: OSA, 1984.

[8] WOOD H A C, HARRINGTON K, BIRKS T A, et al. High-resolution air-clad imaging fibers[J]. Optics Letters, 2018, 43(21): 5311-5314.

[9] 张振远,徐明泉,李 莉,等. 一种高分辨率大信息量光纤传像束的制造工艺试验[J]. 玻璃纤维,2010(2):28-31.
ZHANG Z Y, XU M Q, LI L, et al. Experiment of manufacturing a type of image guide with high resolution and large information content[J]. Fiber Glass, 2010(2): 28-31 (in Chinese).